

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

IVICA HERAK

Zagreb, 2008.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

PRIMJENA I SPECIFIČNOSTI MAG-STT POSTUPKA ZAVARIVANJA

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:
Prof.dr.sc. SLOBODAN KRALJ

IVICA HERAK

Zagreb, 2008.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Slobodanu Kralju na mentorstvu, asistentici Tanji Tomić na stručnoj pomoći i vođenju kroz izradu završnog rada, te djelatnicima Laboratorija za zavarene konstrukcije koji su obavili eksperimentalno zavarivanje.

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
IZJAVA.....	V
1. UVOD	1
1.1. Općenito o MAG postupku zavarivanja.....	2
1.2. Općenito o STT postupku zavarivanja.....	7
2. USPOREDBA STT POSTUPKA ZAVARIVANJA I KONVENCIONALNOG MAG POSTUPKA	10
3. KARAKTERISTIKE STT POSTUPKA ZAVARIVANJA	13
3.1. Parametri zavarivanja kod STT postupka	14
3.2. Opis rada STT postupka zavarivanja	18
4. PRIMJENA STT POSTUPKA KOD ZAVARIVANJA KORIJENA CIJEVI.....	20
4.1. Shematski prikaz poluautomatskog zavarivanja otvorenog korijena cijevi.....	21
4.2. Automatsko zavarivanje STT postupkom zavarivanja.....	26
5. EKSPERIMENTALNI DIO.....	27
5.1. Zavarivanje ploča	29
5.1.1. Zavarivanje ploče 1	30
5.1.2. Zavarivanje ploče 2	32
5.1.3. Zavarivanje ploče 3	33
5.2. Izrezivanje i priprema makroizbrusaka	34
5.3. Makroizbrusci.....	35
5.4. Zavarivanje tankih limova.....	36
6. Analiza rezultata.....	39
7. ZAKLJUČAK	42
8. LITERATURA.....	43

SAŽETAK

U radu se opisuje STT (Surface Tension Transfer) postupak zavarivanja proizvođača Lincoln Electric, njegova primjena i prednosti u usporedbi s konvencionalnim MAG (Metal Active Gas) postupkom zavarivanja.

Nakon prikupljene i proučene literature, te članaka proizvođača i distributera, izveden je eksperimentalni dio u laboratoriju katedre "Zavarene konstrukcije" (Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb).

U eksperimentu su zavarena tri uzoraka STT postupkom i tri uzoraka konvencionalnim MAG postupkom, gdje su istraživane krajnje granice i mogućnosti oba postupka.

Rezultati eksperimenta su također detaljno prikazani u radu.

Postupak se uspješno koristi za izvođenje zavarivanja korijena cijevnih spojeva, nakon čega slijedi popuna žlijeba, po potrebi, nekim drugim postupkom zavarivanja.

POPIS SLIKA

Slika 1.1 Oprema za MIG/MAG zavarivanje	3
Slika 1.2 Prijenos metala kratkim spojevima kod MAG zavarivanja	5
Slika 1.3 Temeljni načini prijenosa metala kod MAG postupka zavarivanja	6
Slika 1.4 Prikaz STT uređaja za zavarivanje	8
Slika 2.1 Usporedba unosa topline kod STT postupka zavarivanja u odnosu na druge postupke prijenosa metala	11
Slika 2.2 Usporedba štrcanja; konvencionalni MAG lijevo i STT postupak desno	11
Slika 3.1 Utjecaj vršne struje na geometriju zavara	14
Slika 3.2 Utjecaj pozadinske struje geometriju zavara	15
Slika 3.3 Shematski prikaz sustava za On-line monitoring praćenje glavnih parametara MAG-STT postupka zavarivanja	16
Slika 3.4 Primjena on-line monitoring sustava za praćenje glavnih parametara kod MAG-STT zavarivanja; napona (a) i struje (b)	17
Slika 3.5 Zapisi napona i jakosti struje za slučajno odabran vremenski interval od 0,012 sekundi	17
Slika 3.6 Grafički prikaz STT postupka zavarivanja	18
Slika 3.7 STT II uređaj za zavarivanje	19
Slika 4.1 Primjer otvorenog korijena cijevi zavarenog STT postupkom, lijevo i sam postupak zavarivanja cijevi STT postupkom, desno	25
Slika 4.2 STT postupak zavarivanja u automatskom sustavu	26
Slika 5.1 Uređaj za MAG-STT zavarivanje LINCOLN ELECTRIC STT II desno i dodavač žice LF 37 lijevo	27
Slika 5.2 Uređaj za MAG zavarivanje FRONIUS TRANSPULSSYNERGIC 3200 sa dodavačem žice VR4000	28
Slika 5.3 Izgled pripreme ploča za zavarivanje	29
Slika 5.4 Rezanje makroizbrusaka plazma rezačicom	34
Slika 5.5 Limovi zavareni MAG-STT postupkom	36
Slika 5.6 Pokušaj zavarivanja limova MAG postupkom	37
Slika 5.7 Detalj lima koji je neuspjelo zavaren MAG postupkom	38
Slika 5.8 Usporedba geometrije zavara mikroizbrusaka S1 i M1	39
Slika 5.9 Usporedba geometrije zavara makroizbrusaka S2 i M2	40

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba MIG/MAG i STT postupka zavarivanja	12
Tablica 2. Prikaz nekih materijala za cjevovode testirani sa MAG-STT zavarom korijena	21
Tablica 3. Dimenzije ploča koje su zavarivane u eksperimentu	29
Tablica 4. Parametri zavarivanja ploče 1	30
Tablica 5. Vremena zavarivanja ploče 1	30
Tablica 6. Lice i naličje ploče 1	31
Tablica 7. Označene površine makroizbrusaka na ploči 1	31
Tablica 8. Parametri MAG-STT zavarivanja ploče 2	32
Tablica 9. Lice i naličje korijena ploče 2	32
Tablica 10. Parametri MAG postupka kod zavarivanja ploče 3	33
Tablica 11. Lice i naličje korijena ploče 3	33
Tablica 12. Prikaz makroizbruska	35
Tablica 13. Parametri zavarivanja limova MAG-STT postupkom	36
Tablica 14. Parametri zavarivanja limova MAG postupkom	37
Tablica 15. Minimalni parametri zavarivanja MAG postupkom	37
Tablica 16. Geometrije uzorka S1 i M1	39
Tablica 17. Geometrija uzorka S2 i uzorka M2	40

POPIS OZNAKA

LATINSKE OZNAKE

Opis oznake	Oznaka	Jedinica
Jakost struje	I	A
Vršna struja	I_{PC}	A
Pozadinska struja	I_{BC}	A
Električni napon	U	V
Brzina zavarivanja	v_z	cm/min
Brzina žice	$v_{\dot{z}}$	m/min
Duljina radnog komada	l	mm
Širina radnog komada	b	mm
Debljina radnog komada	s	mm
Slobodni kraj žice	L	mm
Protok plina	Q	l/min
Induktivitet	L	H
Promjer žice	d_z	mm
Vrijeme zavarivanja	t	s
Nadvišenje korijena	h	mm
Debljina radnog komada	s	mm
Visina korijenskog zavora	p	mm
Širina korijenskog zavora	b	mm
Širina naličja korijena	c	mm

GRČKE OZNAKE

Opis oznake	Oznaka	Jedinica
Nagib pištolja	α	(°)

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio potpuno samostalno na temelju znanja i vještina koje sam stekao tijekom dosadašnjeg školovanja i prikupljene literature.

Ivica Herak

1. UVOD

STT (Surface Tension Transfer) postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja u plinskoj zaštiti i predstavlja važnu tehnologiju spajanja u metaloprerađivačkoj industriji.

Može se koristiti kod zavarivanja različitih materijala, a troškovi početne investicije kod nabave STT uređaja su relativno niski. STT postupak zavarivanja se uspješno koristi za zavarivanje korijena cijevi, dok popunu žlijeba možemo izvesti nekim drugim konvencionalnim postupkom zavarivanja. U ovom radu prikazan je princip rada STT postupka, uže područje primjene, te je izveden eksperiment. U eksperimentu je izvedena usporedba STT i konvencionalnog MAG postupka, tako što smo zavarili 3 uzorka STT postupkom i 3 uzorka MAG-om.

Kod postupaka zavarivanja u plinskoj zaštiti kao što je MIG/MAG i STT može se upotrebom posebnih plinskih mješavina omogućiti veliko poboljšanje samog procesa zavarivanja, kao što su veća produktivnost i bolja kvaliteta zavarenog spoja. Zbog toga je kod STT postupka zavarivanja potrebno odabrati optimalnu plinsku mješavinu za svaki slučaj primjene.

Kod mehaniziranih postupaka zavarivanja može se postići dobra kvaliteta zavara kada zaštitni plin:

- daje visoki unos topline, a time i dobru penetraciju
- osigurava vrlo dobru stabilnost električnog luka
 - upotreba plinova koji sadrže male količine aktivnih komponenti umjesto uobičajenih zaštitnih plinskih mješavina (npr., pri zavarivanju konstrukcijskih čelika)

STT postupak je ustvari poboljšana verzija MIG/MAG postupka zavarivanja, gdje STT ima mogućnost podešavanja više parametara i uvedene su neke nove inovacije kod prijenosa materijala, (koji je kasnije detaljnije u radu objašnjen). To rezultira manjim unosom topline kod zavarivanja, smanjenim prskanjem i povećanjem produktivnosti kod zavarivanja.

1.1. Općenito o MAG postupku zavarivanja

MAG zavarivanje je elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina. Kod ovog postupka zavarivanja električni luk se održava između taljive, kontinuirane elektrode u obliku žice, u pravilu spojene na plus pol istosmjernog izvora struje.

Uređaj za MIG/MAG zavarivanje je u oba slučaja isti; pogonski sistem dodaje žicu konstantnom brzinom kroz cijevni paket i pištolj u električni luk. Žica je istovremeno i elektroda i dodatni materijal, odnosno njezinim taljenjem se popunjava pripremljeni žlijeb.

Kada se zavarivanje vrši na udaljenosti većoj od 5m od izvora struje, te kada se radi s tanjim žicama ili žicama od mekših materijala (Al i njegove legure) obično se primjenjuje dodatni sustav za dodavanje žice. Takav sustav zove se „push-pull“ sustav i njegova primjena sprječava gužvanje žice unutar cijevnog vodiča (polikabela).

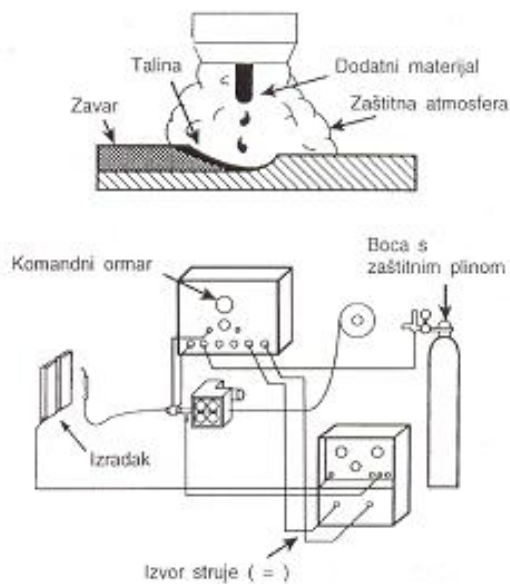
Zaštitni plinovi koji se koriste kod ovog postupka štite rastaljeni materijal od utjecaja okolne atmosfere, a dovode se na mjesto zavarivanja kroz posebnu sapnicu na pištolju, koja se nalazi oko kontaktne cjevčice.

Kada se zavaruju nelegirani konstrukcijski čelici moguća je primjena aktivnih plinova (čistog CO₂ ili mješavina aktivnog plina).

Kod MAG zavarivanja najčešće se koriste pune žice promjera od 0,6 do 2,4 mm, a žice od čeličnih materijala su pobakrene ili poniklane radi boljeg električnog kontakta i zaštite od korozije. Površina žice mora biti glatka, dimenzija vrlo točna i treba biti uredno namotana na kolutove koji se postavljaju u uređaj za dodavanje. Osim punih žica koriste se i praškom punjene žice.

Parametri kod MAG zavarivanja:

- jakost struje I (A) -brzina žice
- napon električnog luka U (V) -visina električnog luka
- brzina zavarivanja v (cm/min)
- slobodni kraj žice l (mm)
- protok plina Q (l/min) i vrsta plina
- induktivitet L (H)
- promjer žice d_z (mm) i nagib pištolja α (°)



Slika 1.1. Oprema za MIG/MAG zavarivanje [1]

PREDNOSTI:

- Primjenjiv za zavarivanje svih vrsta materijala
- Velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa materijala
- Zavarivanje u svim položajima
- Zavarivanje u radionici i na terenu
- Mogućnost primjene različitih plinskih mješavina
- Mogućnost primjene praškom punjene žice
- Široki raspon debljina
- Velika učinkovitost i proizvodnost
- Pogodan za automatizaciju
- Moguća primjena i za lemljenje [1]

NEDOSTACI:

- Kod rada na terenu moguće greške zbog loše zaštite (vjetar koji može odpuhivati zaštitni plin)
- Problemi kod dovođenja žice (posebno aluminij - jer je mekan i može doći do "gužvanja" kod dovođenja)

- Veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja (naljepljivanje, poroznost)
- Štrcanje kod zavarivanja kratkim spojevima (gubici i potreba za naknadnom obradom!)
- Složeniji uređaji (dovođenje žice, automatska regulacija) [1]

Pri MIG/MAG zavarivanju prijenos metala s elektrode (žice) u talinu na radnom komadu obavlja se diskretnim komadićima metala ili metalnim kapljicama.

Prijenos metala se može realizirati tako da se kapljice s vrha elektrode prenose kroz električni luk slobodnim letom ili da metalne kapljice s vrha elektrode ostaju uronjene u talini prilikom kratkog spoja elektrode i radnog komada. Prijenos se može ostvariti i tako da se dio metala pri zavarivanju prenese na jedan način, a dio metala na drugi način.

Prema parametrima zavarivanja i debljini žice razlikujemo četiri karakteristična načina prijenosa: [1]

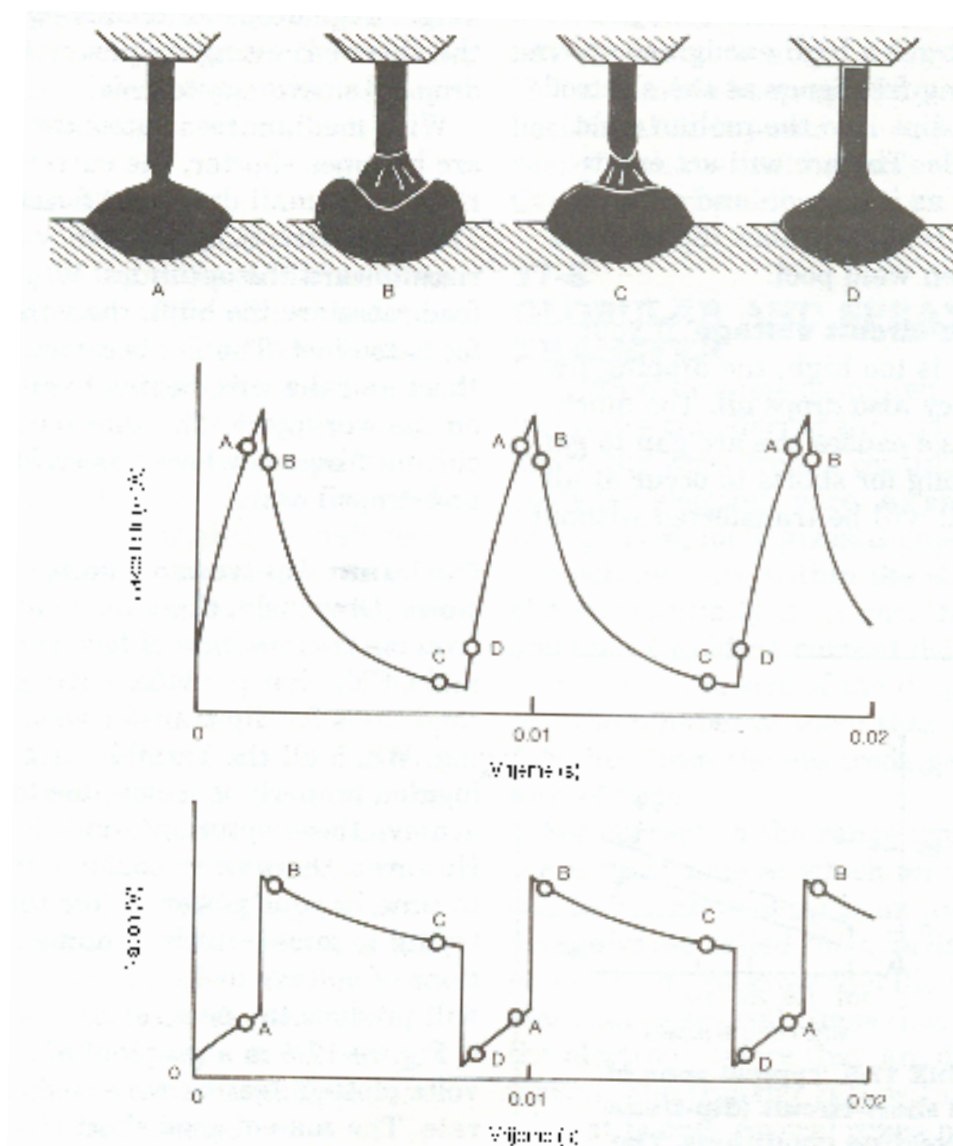
1. kratkim spojevima (niska unešena energija, tanji limovi, prisilni položaji, 13-21V, 50-170A)
2. prijelaznim lukom (22-25V, 170-235A,)
3. štrcajućim lukom (25-40V, 200-600A - deblji materijali, veća učinkovitost)
4. impulsno zavarivanje (kontrolirani prijenos štrcajućim lukom „kapljica metala po impulsu“)

Kod načina prijenosa metala kratkim spojevima povećanje kapljice kod zavarivanja s niskim strujama se ograničava postavljanjem nižeg napona električnog luka čime se smanjuje i duljina električnog luka. Mala kapljica tekućeg metala na vrhu elektrode prenosi se na radni komad kratkim spojevima kako je to prikazano na Slici 1.2.

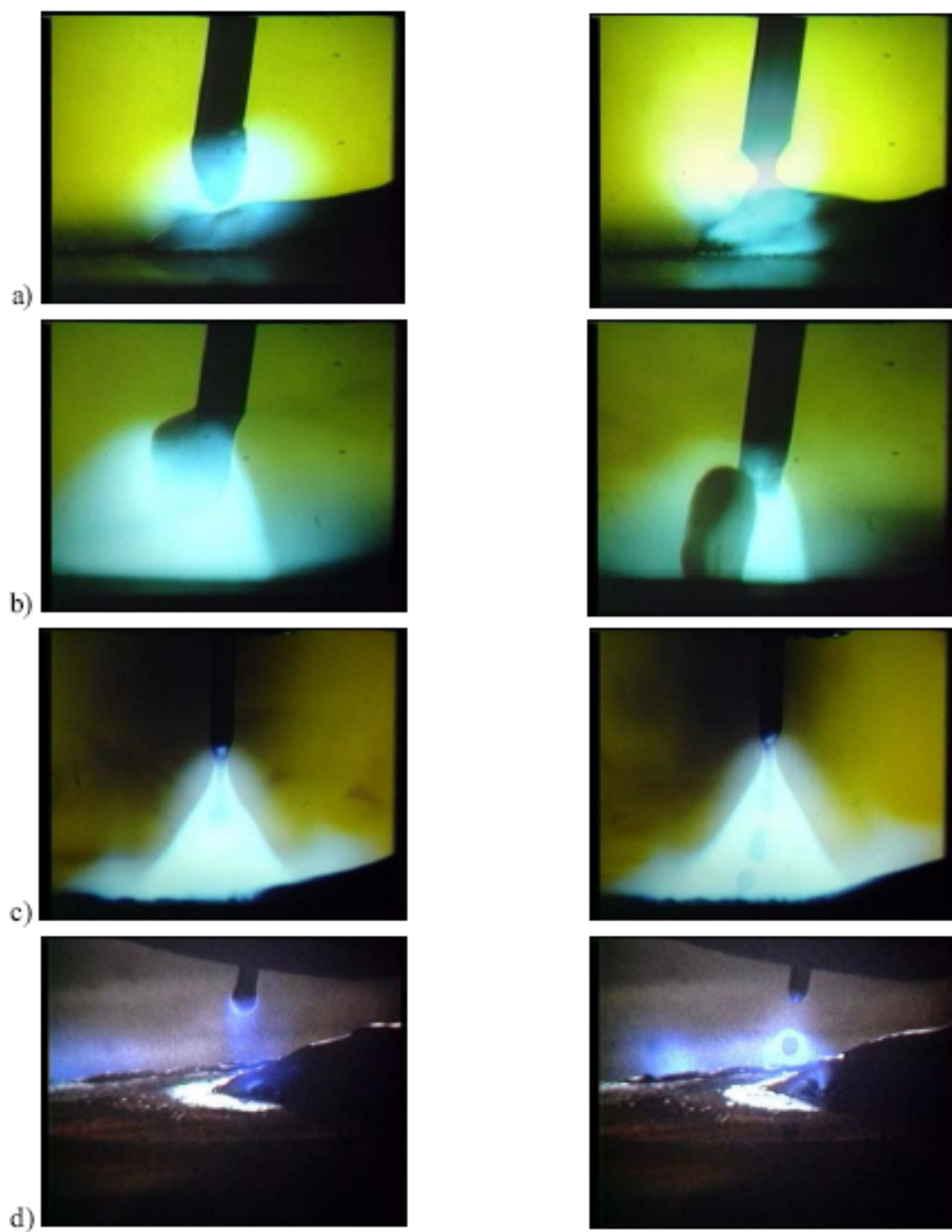
Prijenos metala mješovitim lukom događa se kod nižih struja gdje rastaljeni metal formira velike kapljice na kraju žice za zavarivanje. Kapljica će nastaviti rasti sve dok sile koje djeluju prema dolje postanu veće nego sila površinske napetosti i tada će se kapljica odvojiti od vrha elektrode. Kapljica se uglavnom prenosi uslijed sila gravitacije na radni komad i radijus kapljice je veći (obično 1,3 do 2 puta) nego radijus žice za zavarivanje. Kada se lagano poveća struja takva velika kapljica može se odlijepiti zbog elektromagnetskih sila.

Pri većim strujama zavarivanja i većim iznosima napona električnog luka odvija se prijenos metala štrcajućim lukom gdje su kapljice odlijepljene od žice za zavarivanje i izbačene su u luku sa jakim elektromagnetskim silama.

Kako su se novi MAG postupci zavarivanja razvili i kako se tehnologija izvora struje poboljšala, pronašlo se nekoliko novih načina prijenosa metala, posebno u izbacivanju metalnih kapljica kroz električni luk. Tako se razvio prijenos metala impulsnim strujama da se dobije prijenos metala kapljicama kod manjih vrijednosti struje za zavarivanje. Intenzivni impuls struje koji se prenosi za vrijeme perioda male struje je upotrebljen da rastali i odvoji kapljicu od žice. Bez impulsnih struja s niskim iznosom konstantne struje rastaljeni metal bi se prenosio kao velike kapljice (mješoviti luk).



Slika 1.2 Prijenos metala kratkim spojevima kod MAG zavarivanja [1]



Slika 1.3 Temeljni načini prijenosa metala kod MAG postupka zavarivanja [2]

- a) kratkim spojevima
- b) mješovitim lukom
- c) štrcajućim lukom
- d) impulsno zavarivanje

1.2. Općenito o STT postupku zavarivanja

STT je revolucionarni sustav zavarivanja tvrtke "Lincoln Electric" koji udružuje invertorsku tehnologiju visoke frekvencije s naprednim tehnologijama upravljanja oblikom električnog luka, koja zamjenjuju klasičnu MIG/MAG tehnologiju.

Zavarivači koji zavaruju MAG postupkom zavarivanja, mogu bez problema savladati i Lincolnov STT postupak, koji je pogodan za spajanje različitih metala od konstrukcijskog čelika do duplex nehrđajućih čelika.

U automatiziranom okruženju STT postupak daje visoke brzine popune na tankim materijalima, a postupak također nudi veliku količinu prednosti posebno kod materijala povišene čvrstoće i kod korijenskog zavarivanja cijevi. STT uređaj za zavarivanje se trajno dokazuje kao izuzetno pouzdan s niskom količinom kvarova, koji daje vrhunske performanse, čist i visokokvalitetan zavar prilikom svake upotrebe. [3]

Preciznim upravljanjem strujom zavarivanja na STT uređaju kroz cijeli ciklus zavarivanja značajno smanjujemo dimove i pare kod zavarivanja, prskanje, te vrijeme brušenja čime imamo veću produktivnost. STT uređaj ima nezavisno upravljanje brzinom dodavanja žice od upravljanja strujom zavarivanja, a isporučuje se s ekranima za prikaz brzine žice, te digitalnim voltmetrom i ampermetrom.

Uređaj je također opremljen pouzdanim pogonskim sustavom žice s četiri valjka, koji nam osigurava nesmetano dodavanje žice.

Prijenos površinskom napetošću (STT) je kontrolirani prijenos materijala kratkim spojevima koji prilagođuje oblik vala struje i napona fizici zavarivačkog luka i prijenosa metala u istom. Postupak smanjuje prskanje odrezujući vrškove struje u trenutku prije nego što se tekući most između žice i radnog predmeta odlomio u električni luk. Most se lomi površinskom napetošću i teče mehaničkom inercijom pri niskim strujama. Iskorištavanjem Lincolнове tehnologije upravljanja oblikom strujnog vala (engl. Waveform Control Technology) STT omogućuje dopremu i promjenu struje u žici za zavarivanje unutar mikrosekundi. Točno upravljanje strujom zavarivanja tijekom cijelog ciklusa zavarivanja značajno smanjuje ili uklanja osnovnu manu MAG zavarivanja električnim lukom kratkog spoja, [3].



Slika 1.4 Prikaz STT uređaja za zavarivanje [3]

PREDNOSTI STT POSTUPKA ZAVARIVANJA:

- velika brzina zavarivanja, veća produktivnost u usporedbi sa ostalim postupcima, a posebno u usporedbi sa TIG zavarivanjem,
- manji unos topline,
- mogućnost zavarivanja različitih tipova materijala,
- smanjena mogućnost hladnog naljepljivanja,
- manji broj prekida zavarivanja, a time i manja mogućnost pojave grešaka,
- dobra kontrola rastaljene kupke,
- puno manje prskanja i smanjeno vrijeme čišćenja zavara,
- mogućnost korištenja mješavina plinova (CO_2 , $\text{Ar-82\%+CO}_2\text{-1 8\%}$, $\text{Ar-98\%+CO}_2\text{-2\%}$, ...),
- smanjena emisija dimnih plinova,
- povoljniji uvjeti rada za zavarivača i lagano usavršavanje,
- visoke brzine posmaka u automatiziranom radu
- precizno upravljanje unosom topline smanjuje toplinske deformacije i greške u oblikovanju korijena zavara, od kojih je jedna moguća „curenje taline“
- upravljanje parametrom „Hot Start“ osiguravamo precizno upravljanje zavarom kod početka zavarivanja

NEDOSTACI STT POSTUPKA ZAVARIVANJA:

- relativno visoka cijena koštanja opreme za STT zavarivanje u usporedbi s konvencionalnim MAG postupkom
- ograničena primjena zbog samo jednog načina prijenosa metala
- do punog izražaja prednosti ovog postupka dolaze tek u kombinaciji s ostalim visokoučinskim postupcima zavarivanja za popunu žlijeba za zavarivanje

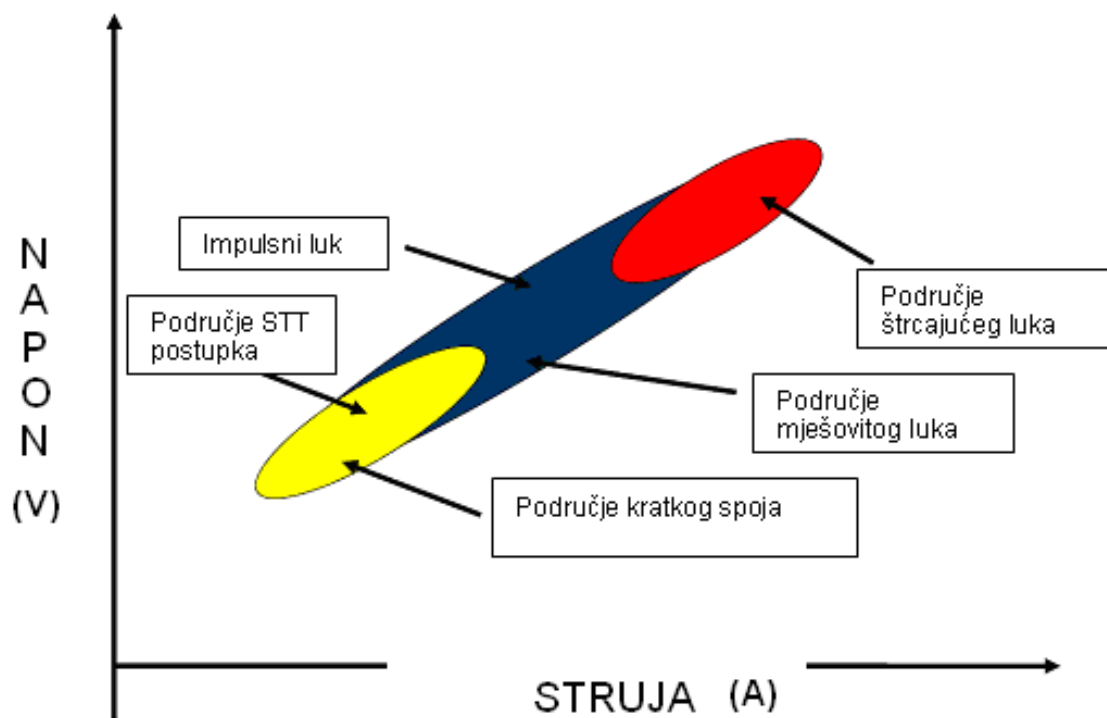
2. USPOREDBA STT POSTUPKA ZAVARIVANJA I KONVENCIONALNOG MAG POSTUPKA

STT postupak zavarivanja je suvremeni postupak zavarivanja koji se koristi za zavarivanje korijena zavara u otvorenom žlijebu.

STT postupak zavarivanja je postupak kojeg prvenstveno odlikuje niski unos topline pri zavarivanju. Može se primjenjivati kod zavarivanja nehrđajućih čelika i legura nikla (prehrambena i petrokemijska industrija), silikonske bronce (autoindustrija), te galvaniziranih čelika. Konstruiran je za zahtjevna poluautomatska i automatska zavarivanja, te se može prilagoditi robotizaciji.

PREDNOSTI STT POSTUPKA U ODNOSU NA KONVENCIONALNI MAG POSTUPAK:

- kod korištenja uobičajenih zaštitnih plinova smanjeno je prskanje u odnosu na MAG zavarivanje; točnije kod korištenja CO₂ zaštitnog plina na većini čeličnih legura STT postupak uz pravilno odabrane parametre daje manje prskanje nego konvencionalni MAG postupak zavarivanja.
- manji unos topline nego kod konvencionalnog MAG postupka zavarivanja
- precizno upravljanje strujom zavarivanja neovisno o brzini žice
- smanjeni dimovi i pare kod zavarivanja
- lakše zavarivanje korijena cijevi okomito prema dolje
- veća kontrola električnog luka i penetracije taline



Slika 2.1 Usporedba unosa topline kod STT postupka zavarivanja u odnosu na druge postupke prijenosa materijala

Iz Slike 2.1 je vidljivo da je područje STT postupka zavarivanja područje s najmanjim unosom topline u usporedbi s ostalim konvencionalnim postupcima.



Slika 2.2 Usporedba štrcanja; konvencionalni MAG lijevo i STT postupak desno [5]

Tablica 1. Usporedba MAG i STT postupka zavarivanja [6]

Postupci zavarivanja	MAG	STT
Načini prijenosa materijala	Kratkim spojevima	Modificirani el. luk sa mogućnosti promjene napona i struje u ovisnosti o luku
Naponi zavarivanja	16V do 22V	16V do 22V
Struja zavarivanja	30A do 200A	Dvije struje kod zavarivanja: -vršna struja (0A do 450A) -pozadinska struja (0A do 125A)
Debljina žice za zavarivanje	Tipični manji promjeri (0.60mm do 1.10mm)	Tipični veći promjeri (0.85mm do 1.20mm)
Prednosti	- zavarivanje u svim položajima - niski troškovi	- mali i kontrolirani unos topline - zavarivanje u svim položajima - minimalno prskanje - može koristiti žice za zavarivanje većih promjera - minimalni dimovi i pare - manji troškovi zaš. plinova - dobra fuzija
Nedostaci	- prskanje - otežano zavarivanje tanjih materijala	- puno skuplja oprema - ograničen na modificirani način prijenosa metala kratkim spojevima
Cijena	cca. 3.000 \$	cca. 6.000\$
Materijali koje možemo zavarivati	- ugljične i nisko legirane čelike - galvanizirane/pocinčane čelike - nehrđajuće čelike i niklove legure - silikonska bronca i legure bakra	- ugljične i nisko legirane čelike - galvanizirane/pocinčane čelike - nehrđajuće čelike i niklove legure (sa izvrsnim smanjenjem prskanja) - silikonska bronca i legure bakra
Primjena u industriji	- automobilska industrija - prehrambena i petrokemijska industrija - gdje uvjeti dopuštaju	- automobilska industrija - cjevovodi i posude pod tlakom - generatori - prehrambena i petrokemijska industrija - tanji limovi

3. KARAKTERISTIKE STT POSTUPKA ZAVARIVANJA

STT izvor struje za zavarivanje nema ni padajuću (CC) niti ravnu karakteristiku (CV). [7]

Na osnovu trenutnih zahtjeva električnog luka, uređaj osigurava izlazne parametre koji omogućuju zavarivanje kratkim spojevima, a rastaljena kapljica se prenosi u žlijeb za zavarivanje pomoću sile površinske napetosti između kapljice i kupke. STT uređaj učestalo i precizno kontrolira struju zavarivanja u svim fazama, a optimalne karakteristike luka održavaju se i kod značajnijih promjena duljine slobodnog kraja žice. U principu, to je uređaj koji je u stanju promijeniti i postići zahtjevanu struju zavarivanja u mikrosekundama. Dizajniran je za poluautomatsku primjenu gdje se brzina zavarivanja i duljina slobodnog kraja žice mijenjaju. Može koristiti različite zaštitne plinove i njihove mješavine (CO_2 , $\text{Ar-82\%+CO}_2\text{-18\%}$, $\text{Ar-98\%+CO}_2\text{-2\%,...}$), ovisno o vrsti materijala koja se zavaruje, [7].

Takav način kontrole i održavanja parametara zavarivanja pomoću izvora za zavarivanje omogućuje ugodniji rad zavarivaču, koji ne mora održavati točnu duljinu slobodnog kraja žice. Zatim, zavarivanje sa manjim prskanjem rastaljenog materijala, s manje proizvedenih dimnih plinova, s manjim zračenjem i isijavanjem topline također omogućavaju lakši rad zavarivaču.

Isto tako, manji unos topline smanjuje i deformacije i zaostale napetosti uslijed zavarivanja. STT uređaj za zavarivanje prvenstveno se koristi za zavarivanje korijenskog zavara u grlu žlijeba. Zavarivanje ovim postupkom ostvaruje se vrlo kvalitetan zavareni spoj, [7].

STT proces zavarivanja samo naizgled podsjeća na impulsni MAG postupak zavarivanja kratkim spojevima, no u osnovi je to sasvim različit, novi postupak zavarivanja. Ovo je postupak zavarivanja sa definiranim izlaznim oblicima razdioba napona i struje tijekom trajanja procesa zavarivanja, a pri kojima se rastaljene kapljice doslovce «uvlače» u rastaljenu kupku pomoću sila površinske napetosti. Proces zavarivanja odvija se ciklički, a postavljanjem ispravnih parametara zavarivanja na displeju uređaja osiguravaju se stabilnost električnog luka i stabilnost cjelokupnog procesa zavarivanja, te ponovljivost procesa zavarivanja. Struja zavarivanja se mijenja u mikrosekundama, ovisno o iznosu napona u električnom luku, [7].

3.1. Parametri zavarivanja kod STT postupka

Kod STT postupka zavarivanja možemo podesiti više parametara u odnosu na konvencionalni MAG postupak zavarivanja.

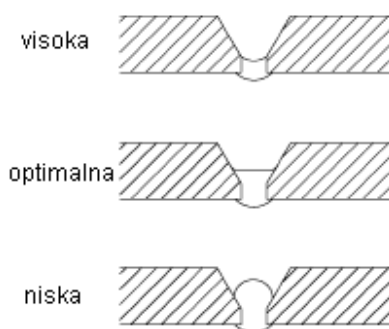
Parametri zavarivanja se usklađuju uglavnom prema uputama proizvođača ili se pronalaze vlastita iskustvena rješenja za pojedine situacije zavarivanja. Kontroliraju se tako da se pri zavarivanju, namjernim smanjivanjem i povećavanjem duljine slobodnog kraja žice ostvaruje stabilan električni luk i smanjeno prskanje.

Zavarivanje se većinom izvodi odozgo prema dolje, silaznom tehnikom rada.

Inovacije u parametrima koje imamo kod STT postupka zavarivanja su:

1. Vršna struja (Peak current, I_{PC})

Vršna se struja koristi za definiranje duljine luka, te poboljšava vezivanje, fuziju sa stjenkama osnovnog materijala, [7].



Slika 3.1 Utjecaj vršne struje na geometriju zavora [8]

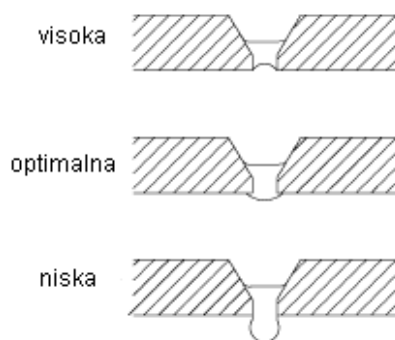
Visoka vrijednost vršne struje povećava duljinu električnog luka, a ako je njena vrijednost previsoka kapljice će imati globularni oblik i veći promjer, te je moguća pojava rasprskavanja.

U suprotnom slučaju, ako je vrijednost vršne struje preniska električni luk je nestabilan. Vrijednost ove struje se mora prilagoditi tako da se postigne minimalno prskanje i mirnoća kupke, [7].

2. Pozadinska struja (Background current, I_{BC})

Pozadinska struja osigurava unos topline u zavareni spoj.

Ovom se strujom također utječe na geometriju zavarenog spoja, gdje će prevelika vrijednost pozadinske struje uzrokovati veći promjer kapljice i povećano prskanje. Ako je opet njena vrijednost niska, električni luk je nestabilan i slabije je kvašenje na stranicama žlijeba, [7].



Slika 3.2 Utjecaj pozadinske struje geometriju zavora [8]

To je slično kako kod uređaja s ravnom karakteristikom izvora struje zavarivanja, kada se zavaruje s niskom vrijednosti napona.

3. Topli/Vrući start (Hot start)

Ovaj parametar kod STT postupka zavarivanja omogućuje lakše uspostavljanje električnog luka, te povećava unos topline pri uspostavljanju električnog luka kako bi se izbjeglo hladno naljepljivanje, jer je radni komad hladan, [7].

4. Tailout

Osigurava dodatni unos topline, a da pri tome rastaljene kapljice ne postaju prevelike. Duljina električnog luka također se ne mijenja. Povećanjem se omogućuje veća brzina zavarivanja i poboljšava kvašenje. Za veće vrijednosti parametara *Tailout* vrijednosti vršne i pozadinske struje se smanjuju, [7].

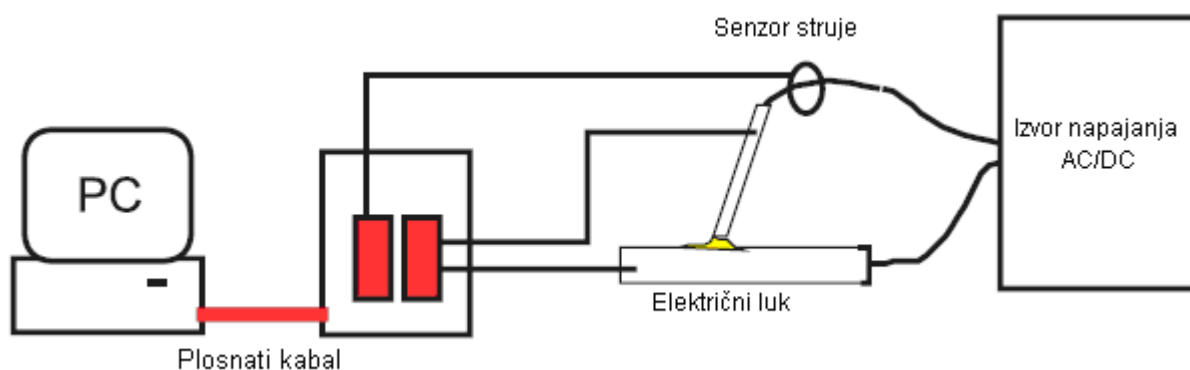
5. Brzina žice (v_z)

Utječe na količinu rastaljnog metala, ali je ona neovisna i posebno se definira, pa ne utječe na vrijednosti vršne i pozadinske struje zavarivanja, [7].

6. Slobodni kraj žice

Slobodni kraj žice utječe na geometriju zavarenog spoja. Ako je vrijednost slobodnog kraja žice velika, oblik zavora sa korijenske strane; naličje zavora je konkavno i uže, a veća je i visina zavora. Za manju duljinu slobodnog kraja žice zavar je širi, ima manju visinu, tanak je, a povećava se i prskanje rastaljenog materijala, [7].

ON-LINE praćenje glavnih parametara kod MAG-STT postupka zavarivanja



Slika 3.3 Shematski prikaz sustava za On-line monitoring praćenje glavnih parametara MAG-STT postupka zavarivanja [9]

Sustav za On-line monitoring praćenje glavnih parametara zavarivanja je korišten za praćenje parametara napona (V) i jakosti struje (A) kod MAG-STT zavarivanja dijela korijena cijevi na konstrukciji letjelice u trajanju od 97 sekundi. Sustav prikuplja uzorke iz procesa sa frekvencijom od 20 kHz na dva kanala; istodobno za struju i napon zavarivanja.

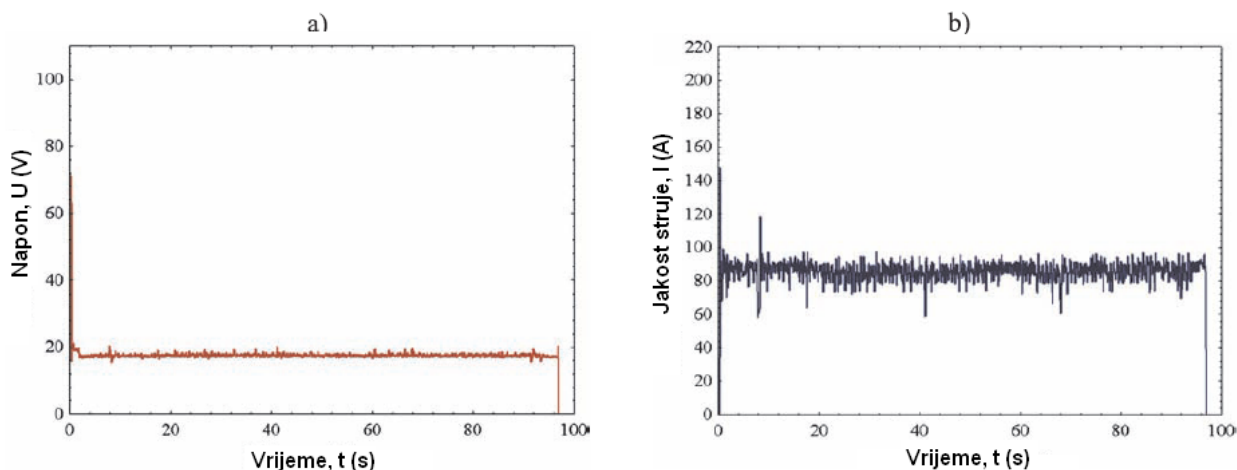
Na slici 3.4 vidimo distribuciju prosječnih vrijednosti napona (a) i jakosti struje (b).

Za dodatni materijal je korištena žica promjera 1 mm, a zaštitni plin je bio Ar-82%+CO₂-18%, a uređaj za zavarivanje je bio Lincoln STT II, sa dodavačem žice LF 30.

Na kontrolnoj ploči STT uređaja bili su namješteni sljedeći parametri: $I_{PC} = 265$ A, $I_{BC} = 65$ A, $v_z = 3$ m/mm, $v = 150$ mm/min, $Q = 15$ l/min.

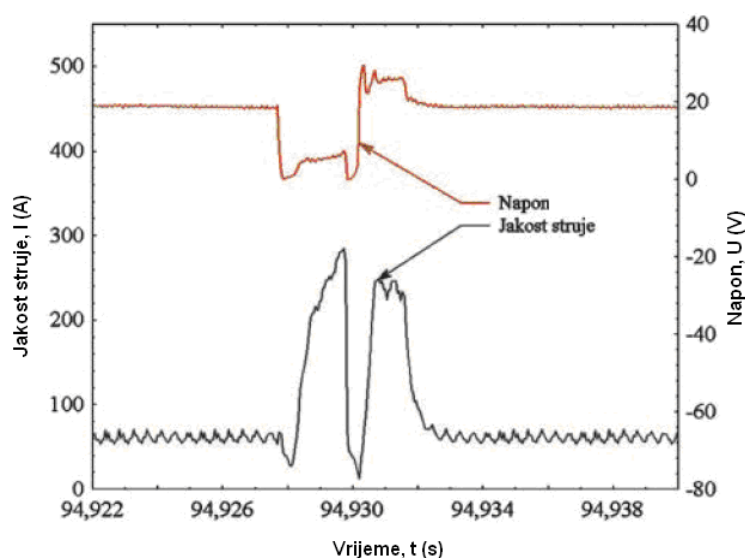
Za vrijeme procesa zavarivanja cijev se rotirala konstantnom brzinom, a zavarivač je održavao električni luk na poziciji između 12 i 2 sata i zavarivao tehnikom silazno dolje. Za vrijeme zavarivanja, struja i napon zavarivanja su praćeni i snimani koristeći On-line sustav za praćenje, a frekvencija uzimanja uzoraka je bila 20 kHz na svakom kanalu mjerenja.

Distribucija napona i jakosti struje je snimljena za vrijeme zavarivanja korijenskog zvara trećeg segmenta cijevi po obodu, a za svakih 1000 podataka izračunavala se aritmetička sredina, pa se s obzirom na odabranu frekvenciju uzrokovanja dobivalo 20 točaka u sekundi koje su opisivale distribuciju aritmetičkih sredina tijekom trajanja zavarivanja, [7].



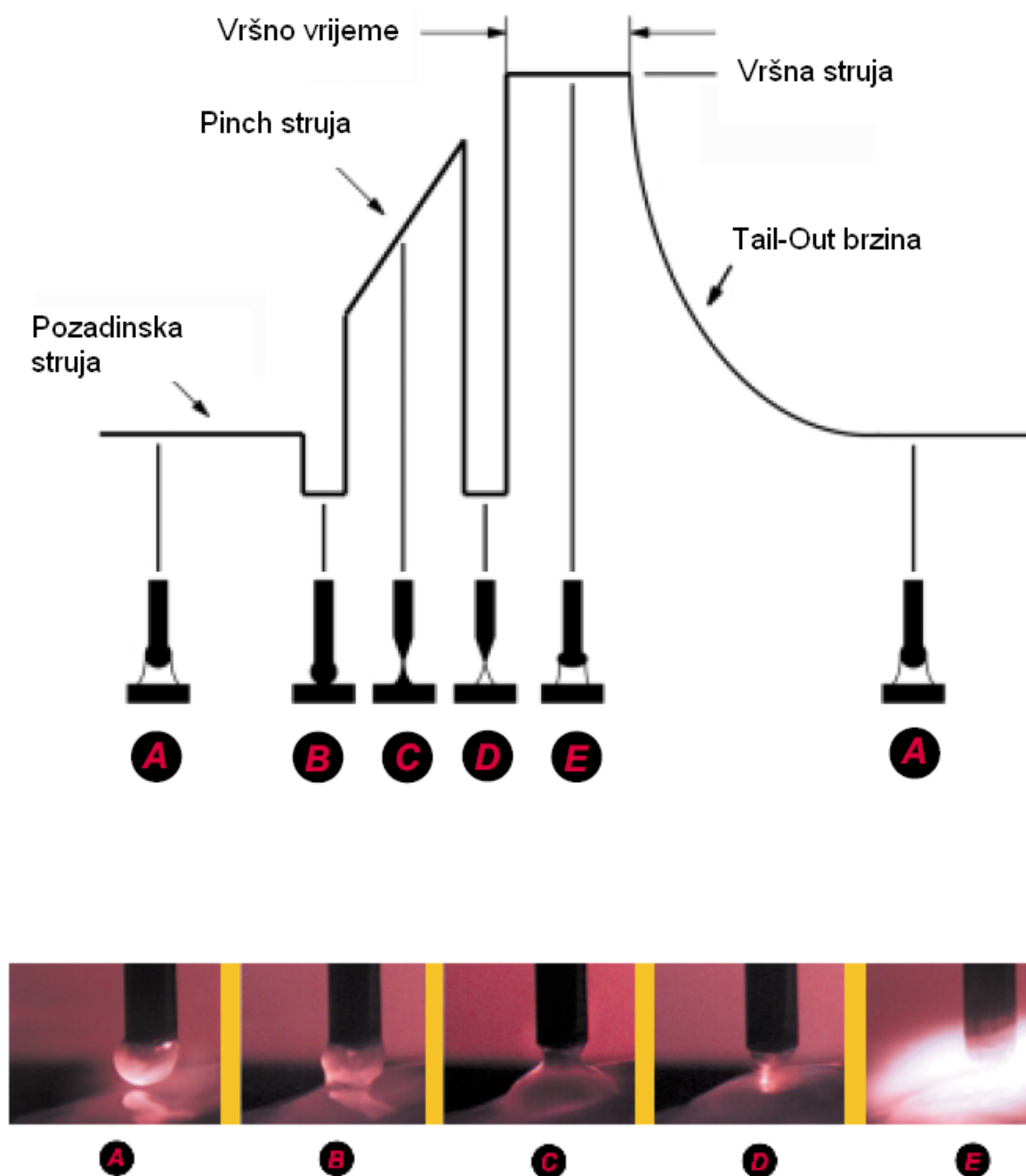
Slika 3.4. Primjena on-line monitoring sustava za praćenje glavnih parametara kod MAG-STT zavarivanja; napona (a) i struje (b) [9]

Na slici 3.5. vidimo nasumično odabranu snimku napona (gornja krivulja) i struje (donja krivulja), za period snimanja svakih 0,012 sekundi, sa frekvencijom uzimanja uzoraka iz procesa 20 kHz.



Slika 3.5 Zapisi napona i jakosti struje za slučajno odabran vremenski interval od 0,012 sekundi [9]

3.2. Opis rada STT postupka zavarivanja



Slika 3.6 Grafički prikaz STT postupka zavarivanja [10]

A – U početnoj točki STT postupka se stvaraju jednolične rastaljene kapljice koje se održavaju krutim sve dok ne dođu u blizinu rastaljene kupke.

B – Kada se metalne kapljice približe rastaljenoj kupki, struja zavarivanja se smanjuje kako bi došlo do prelaska rastaljene kapljice u kupku pomoću sila površinske napetosti.

C – Automatski je tu uključena i precizna "pinch" struja koja se primjenjuje kako bi se ubrzao transfer kapljice u kupku, te se ovdje posebno nadzire i produljenje vrata elektrode.

STT proces osigurava relativno veliku "pinch" struju za stabilnost luka sa istodobnim smanjivanjem prskanja kroz preciznu kontrolu struje.

D – Kada se postigne specifična vrijednost "pinch" struje, STT proces daje električni luk sa nižom razinom struje kao u točki B, prije nego li se metal elektrode razdvoji.

E – Smanjivanjem razine struje, STT proces automatski uključuje vršnu struju koja postavlja odgovarajuću duljinu električnog luka. Vršna struja daje snagu koja pritiska zavarivačku kupku dolje osiguravajući dovoljan unos topline zavarenom spoju i zavarivačkoj kupci.

Za vrijeme jake vršne struje dolazi do potpunog odvajanja kapljice metala u kupku.



Slika 3.7 STT II uređaj za zavarivanje [6]

4. PRIMJENA STT POSTUPKA KOD ZAVARIVANJA KORIJENA CIJEVI

Uobičajeno zavarivanje kratkim spojevima se smatra postupkom malog unosa topline i to rezultira malom penetracijom i nedostacima u spajanju. Struja, koja je proporcionalna brzini žice, može se povećati što poboljšava penetraciju, ali i unos topline. To zahtjeva značajnu vještinu zavarivača da bi dobili dobar zavar. Potrebno je dovoljno topline za spajanje unutarnjih rubova, ali ne previše da ne progori. Zavarivač radi s električnim lukom na rubu taline kako bi napravio dobar zavar, te nema mnogo mjesta za odklon. Ako se luk usmjeri previše unazad, u talinu, može se dogoditi nedovoljna penetracija. Ako je luk previše unaprijed mogao bi pogoditi raspor i progorjeti, što dovodi do curenja taline i posebnog podtlaka na dnu cijevi.

Prije nekoliko godina je otkriveno da je moguće korištenje pulsirajuće tehnike luka za bolju kontrolu taline. Smanjenje struje tijekom kasnije periode luka će ohladiti talinu. Na primjer kod TIG zavarivanja kratko povećanje struje na vršni nivo zatim smanjenje na pozadinsku struju će proizvesti zavar s dobrom penetracijom i spajanjem, a neće progoriti osnovni materijal. Na tom principu radi STT postupak zavarivanja. Visoka (vršna) struja se koristi u strogo određenom intervalu, te uspostavlja dužinu luka i zagrijava osnovni materijal. Struju se tada prebaci na pozadinski nivo, gdje se kontrolira zagrijavanje taline. Ako je talina prevruća može se dogoditi "usisavanje".

Zavarivanje korijena cijevi okomito prema dolje s STT postupkom nije tako teško jer se toplina može podesiti na hladnu talinu neovisno o brzini žice. Taj proces zahtijeva različitu tehniku zavarivanja.

STT postupak zavarivanja dozvoljava razmak u korijenskom zavarivanju cijevi, lakši rad, bolje spajanje rubova i bolje posteljice korijena zavora, te manje špricanja i dimova zavarivanja nego bilo koji drugi dostupan proces.

Također, STT postupak ima mogućnost završiti zavarivanje korijena tri do četiri puta brže nego MAG postupak, sa smanjenim unosom topline i bez nedostatka fuzije.

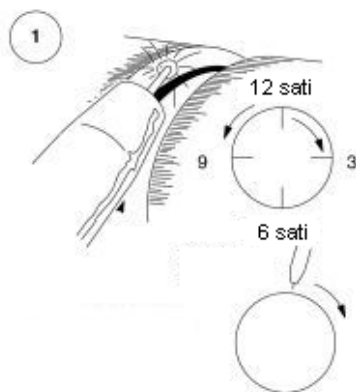
Sa STT tehnologijom zona utjecaja topline je minimalna. Nadalje, dok ostali konvencionalni postupci imaju toplinu unosa 9,8 kJ/cm do 11,8 kJ/cm, unos topline kod STT postupka zavarivanja iznosi oko 2.75 kJ/cm.

Tablica 2. Prikaz nekih materijala za cjevovode testirani sa MAG-STT zavarom korijena [4]

WPQ	Osnovni materijal	Materija l broj	Veličina		Žica za zavarivanje	Zaštitni plin
			Φ(mm)	t (mm)		
LM	EN 10208: L355		114	3,6	LNM 26	Ar + 20% CO ₂
TWI	API 5L: X80		1016	14,8	LA 90	Ar + 20% CO ₂
LPD710	DIN 17175: 15Mo3		166	11	Lnm 12	Ar + 15% CO ₂
DO90	AISI 316L	1,4430	100	3	LNM 316LSI	Ar + 2% CO ₂
STT08 (DM32)	22% Cr DSS	1,4462	250	15	LNM 4462	Ar + 2% CO ₂
STT13 (DM78)	25% Cr DSS (Zeron 100X)	1,4501	280	22	LNM Zeron 100X	Ar + 2% CO ₂
STT14	Legura 254 (6% Mo)	1,4547	215	3,5	LNM NiCro 60/20	Ar + 28% He + 2% CO ₂
STT20	X80 11Cr			15	LNM Zeron 100X	Ar + 2% CO ₂

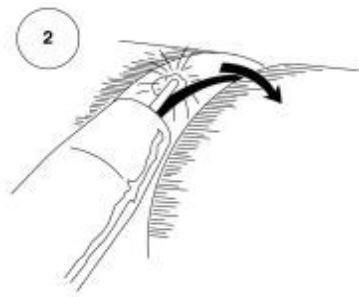
4.1. Shematski prikaz poluautomatskog zavarivanja otvorenog korijena cijevi

1. Električni luk uspostavljamo na bočnoj stranici, nikako ne u samom otvoru žlijeba.



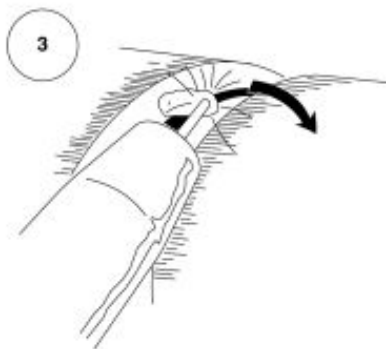
[8]

2. Nakon što je kupka ustaljena, električni luk se vodi ispred dijela kupke.



[8]

3. Pomicanje preko otvora žlijeba.



[8]

4. Lagano pomicanje po bočnoj stranici.



[8]

5. U kupci vodimo elektrodu natrag preko otvora žlijeba.
Elektrodu gibamo u smjeru polumjeseca dolje po zavaru.



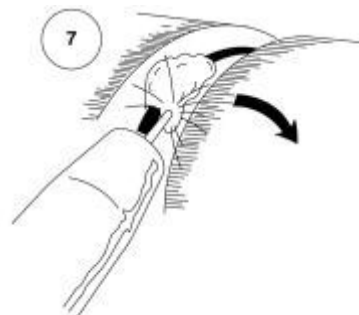
[8]

6. Pomičemo elektrodu nazad i naprijed preko otvora
sve dok ne dođemo do pozicije 1h na satu.



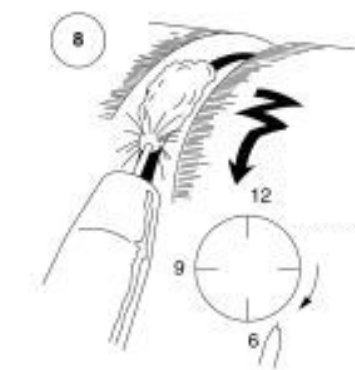
[8]

7. Na poziciji od 1h na satu stajemo pomicati elektrodu naprijed – nazad i koncentriramo
električni luk ispred zavarivačke kupke i pomičemo prema dolje zavar na cijevi sve dok ne
dođemo na poziciju 5h na satu.



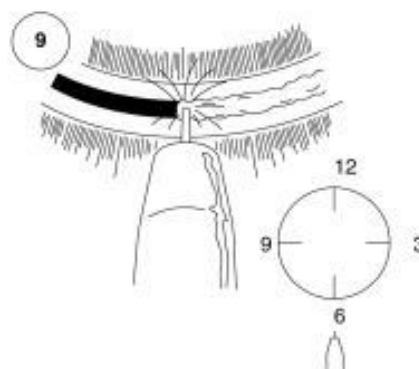
[8]

8. Na poziciji od 5h na satu mijenjamo kut nagiba pištolja za zavarivanje, tako da sada bude okomit na cijev.



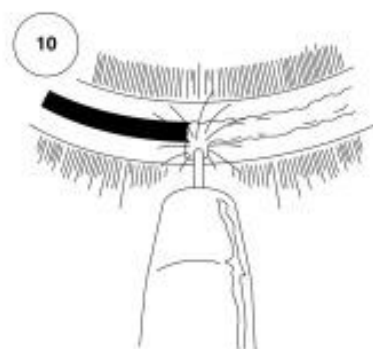
[8]

9. Prestajemo zavarivati na poziciji 6h na satu, pomičući električni luk na bočnu stranicu.



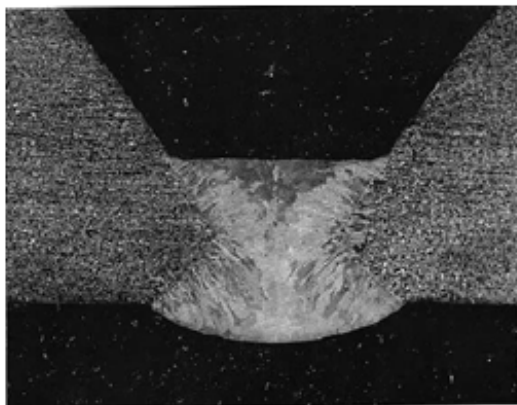
[8]

10. Nikako ne prestati zavarivati u području korijena, jer to može uzrokovati točkaste rupe.



[8]

U dijelu cijevi od 12 do 2 sata položaj može zahtijevati povlačenje pod kutem od 45° i njihanje pištolja sa jedne strane na drugu. Između 2 i 6 sati slobodni kraj žice je namješten pod kut povlačenja 10° do 20° u smjeru posmaka. Njihanje pri zavarivanju najvjerojatnije neće biti potrebno. Između 2 i 4 sata to ovisi o rasponu. Između 4 i 6 sati njihanje će opet biti potrebno. Nakon par probnih zavara, zavarivač će otkriti lakoću zavarivanja STT tehnologijom. Postići će se korijenski zavari debljine 1,5 do 2 mm nadvišenja. Potreban slobodni kraj žice pri zavarivanju je otprilike 6 mm.



Slika 4.1 Primjer otvorenog korijena cijevi zavarenog STT postupkom, lijevo i sam postupak zavarivanja cijevi STT postupkom, desno [8]

4.2. Automatsko zavarivanje STT postupkom zavarivanja



Slika 4.2 STT postupak zavarivanja u automatskom sustavu [8]

Sljedeća prednost STT postupka je ta što postupak možemo koristiti u automatskom zavarivačkom sustavu, gdje nam nisu potrebne bakrene ili keramičke podloge.

Taj patentirani sustav za automatsko zavarivanje (autoweld) u kombinaciji s STT tehnologijom rezultira lakšim i puno bržim zavarivanjem cjevovoda, iznimne kvalitete zavara.

Ovaj automatizirani postupak je posebno bitan kod cjevovoda kod kojih će se u projektu javljati veći broj istovrsnih zavara i gdje će se tražiti visoki zahtjevi za kvalitetu zavara.

5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu provedeno je zavarivanje korijena ploča debljine 10mm od konstrukcijskog čelika Č0361 konvencionalnim MAG postupkom i MAG-STT postupkom zavarivanja. Isti postupci zavarivanja provedeni su na dva uzorka lima debljine 2mm od Č0631. U radu je bilo zadano analizirati dobivene spojeve s aspekta kvalitete zavara i ekonomičnosti.

Eksperimentalni dio proveden je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu, Ivana Lučića 1, Katedra za zavarene konstrukcije u Laboratoriju za zavarene konstrukcije.

MAG-STT zavarivanje je provedeno uređajem LINCOLN ELECTRIC STT II, koji ma dodavač žice tipa LF 37. Uređaj ima polikabel dug 3m.

Korištena je žica koja odgovara zahtjevima norme HRN EN 440: G3Si1 (EZ- CO₂), promjera 1mm i kemijskog sastava: C = 0.06-0.13%, Mn = 1.3-1.6%, Si = 0.7-1%.



Slika 5.1 Uređaj za MAG-STT zavarivanje LINCOLN ELECTRIC STT II desno i dodavač žice LF 37 lijevo

MAG zavarivanje je provedeno uređajem FRONIUS TRANSPULSSYNERGIC 3200, sa dodavačem žice VR4000. Uređaj ima vodeno hlađenje i polikabel dug 3m.



Slika 5.2 Uređaj za MAG zavarivanje FRONIUS TRANSPULSSYNERGIC 3200 sa dodavačem žice VR4000

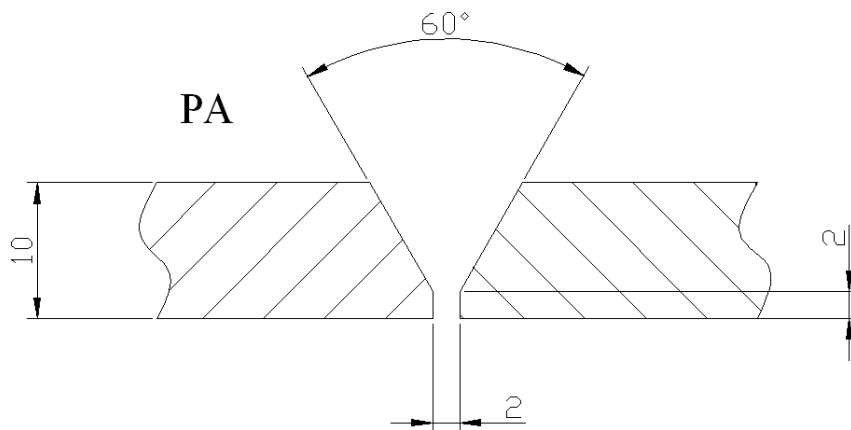
Eksperiment se sastojao od dva dijela.

U prvom dijelu eksperimenta je zavaren korijen na pločama konvencionalnim MAG postupkom i MAG-STT postupkom zavarivanja, te je napravljena usporedba geometrije zavora korijena za ta dva postupka zavarivanja.

U drugom dijelu eksperimenta zavareni su limovi debljine 2 mm MAG i MAG-STT postupkom.

5.1. Zavarivanje ploča

Priprema za sve ploče je bila V oblika, a spoj sučeljeni. Ploče su pripremljene plinskim rezanjem, a nos je brušen brusicom na visinu 2mm.



Slika 5.3 Izgled pripreme ploča za zavarivanje

Tablica 3. Dimenzije ploča koje su zavarene u eksperimentu

Ploča	Duljina [mm]	Širina [mm]	Debljina [mm]
Ploča 1	300	220	10
Ploča 2	320	245	10
Ploča 3	320	245	10

Zavarivanje za sve ploče je bilo poluautomatsko, a zavarivanje je izvodio zavarivač u horizontalnom položaju (PA). Razmak između ploča je bio 2 mm za sve ploče.

Zaštitni plin kod MAG-STT i MAG zavarivanja je bio KRYVAL 18 (Ar-82%+CO₂-18%), koji se prema normi HRN EN 439 označava sa M21.

Kao dodatni materijal za MAG i MAG-STT postupak korištena je žica EZ - CO₂, promjera 1mm, proizvođača „Elektroda Zagreb“, kemijskog sastava: C = 0.06-0.13%, Mn = 1.3-1.6%, Si = 0.7-1%.

Kemijski sastav žice odgovara zahtjevima norme HRN EN 440: G3Si1.

Odabrani su konstantni parametri za oba postupka (MAG-STT i MAG) s kojima su zavarivani korijeni ploča.

Jedna polovica korijenskog zvara ploče 1, točnije 150mm je zavarena MAG-STT postupkom, a druga polovica je zavarena MAG postupkom zavarivanja. Korijen ploče 2 je po cijeloj dužini zavaren MAG-STT postupkom, a korijen ploče 3 je po cijeloj dužini zavaren konvencionalnim MAG-om.

Nakon zavarivanja, ploče su se hladile na zraku. Nakon hlađenja ploče su označene kredom. Slijedilo je označavanje dijela zavara na svakoj ploči koje smo izrezivali plazma rezačicom u svrhu dobivanja makroizbrusaka. Uzorci su iglom označeni na pločama dimenzije otprilike 50x30 mm.

Na ploči 1 označene su dimenzije 2 uzorka; jedan zavaren MAG-STT i jedan zavaren MAG postupkom zavarivanja, a na ploči 2 i ploči 3 označen je po jedan uzorak za izrezivanje.

Na površini označenih uzoraka koje je trebalo izrezati udarene su oznake, kako bi kasnije znali koji smo uzorak zavarili kojim postupkom. Oznakom M1 označen je MAG zavar prve ploče, oznakom S1 MAG-STT zavar prve ploče, oznakom M2 MAG zavar druge ploče i oznakom S2 MAG-STT zavar treće ploče. Ploče su zatim tako označene poslikane.

5.1.1. Zavarivanje ploče 1

Polovica ploče 1 zavarena je MAG-STT postupkom, a druga polovica MAG postupkom zavarivanja.

Tablica 4. Parametri zavarivanja ploče 1

Parametri Postupak zavarivanja	I_{PC} (A)	I_{BC} (A)	I_{st} (A)	U (V)	v_z (m/min)	Q (l/min)
MAG-STT	270	60	77	16,6	3	15
MAG	-	-	77	16	3	15



Prijenos metala kod MAG postupka je bio kratkim spojevima.

Parametri su isti za oba postupka zavarivanja kako bi kasnije mogli usporediti kvalitetu zavara MAG-STT i MAG postupkom zavarivanja, pri istim parametrima.


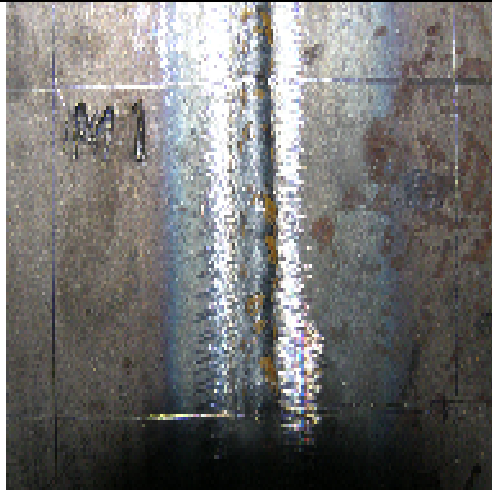
Tablica 5. Vremena zavarivanja ploče 1

Postupak zavarivanja	Vrijeme zavarivanja (s)	Dužina zavara (mm)
MAG-STT	40	150
MAG	48	150

Tablica 6. Lice i naličje ploče 1

Ploča 1	Lice korijena	Naličje korijena
MAG + MAG-STT		

Tablica 7. Označene površine makroizbrusaka na ploči 1

Ploča 1	MAG-STT	MAG
Označena površina makroizbruska		



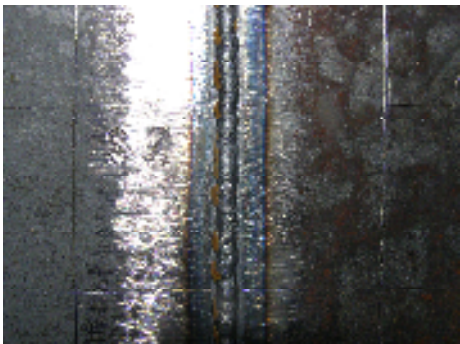
5.1.2. Zavarivanje ploče 2

Korijen ploče 2 je po cijeloj dužini zavaren MAG-STT postupkom zavarivanja.

Tablica 8. Parametri MAG-STT zavarivanja ploče 2

Parametri Postupak zavarivanja	I_{PC} (A)	I_{BC} (A)	I_{st} (A)	U (V)	v_z (m/min)	Q (l/min)	t (s)
MAG-STT	270	60	77	16,6	3	15	58

Tablica 9. Lice i naličje korijena ploče 2

	MAG-STT
Lice korijena ploče 2	
Naličje korijena ploče 2	
Označena površina makroizbruska ploče 2	

5.1.3. Zavarivanje ploče 3

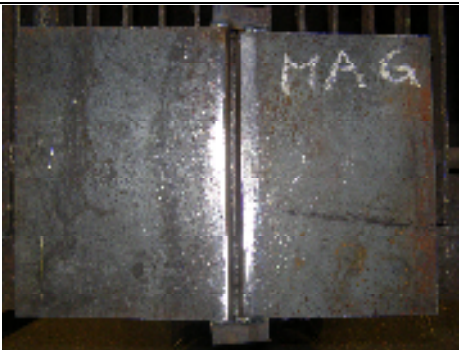

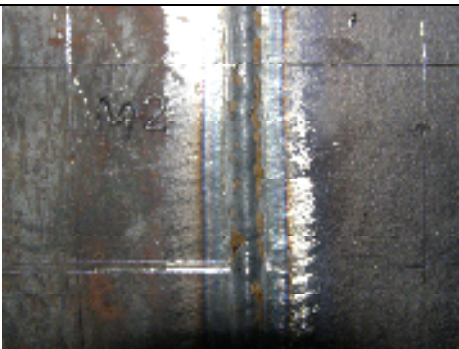
Korijen ploče 3 smo po cijeloj dužini zavarili MAG postupkom.

Tablica 10. Parametri MAG postupka kod zavarivanja ploče 3

Parametri Postupak zavarivanja	I_{st} (A)	U (V)	v_z (m/min)	Q (l/min)	t (s)
MAG	77	16,6	3	15	65

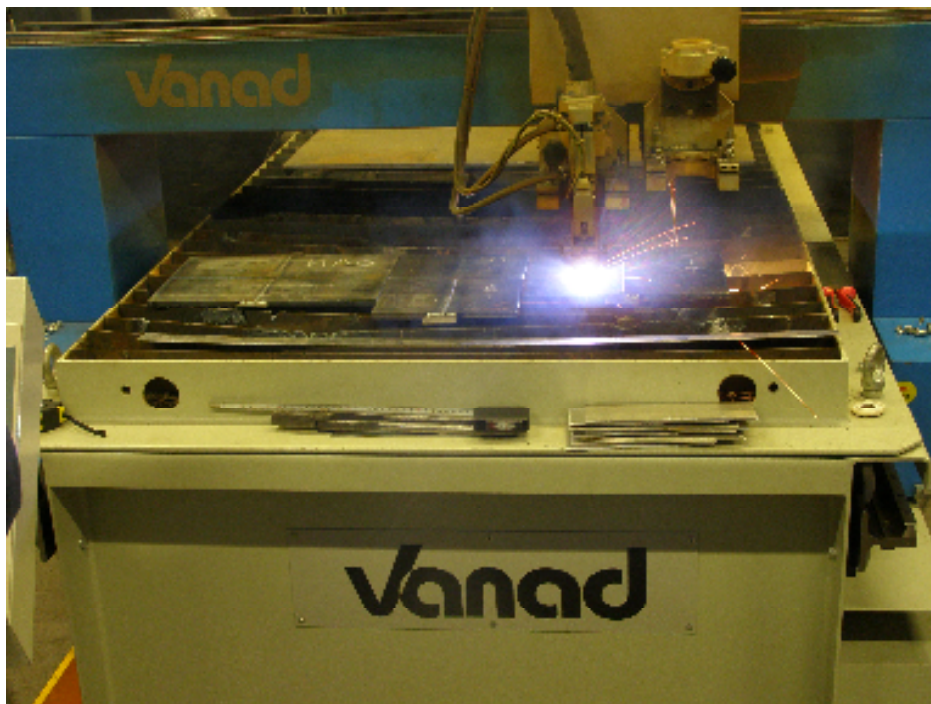
Prijenos metala kod MAG postupka je bio kratkim spojevima.

Tablica 11. Lice i naličje korijena ploče 3

	MAG	
Lice korijena ploče 3		
Naličje korijena ploče 3		
Označena površina makroizbruska ploče 3		

5.2. Izrezivanje i priprema makroizbrusaka

Uzorci su izrezani na plazma rezačici brzinom 0.4 m/s, sa strujom rezanja od 75A i promjerom sapnice 1,1 mm.



Slika 5.4 Rezanje makroizbrusaka plazma rezačicom

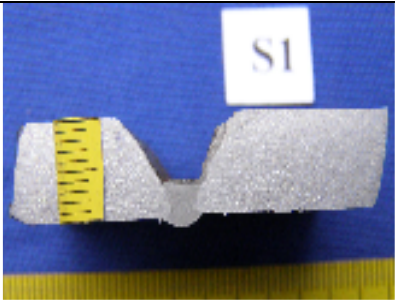

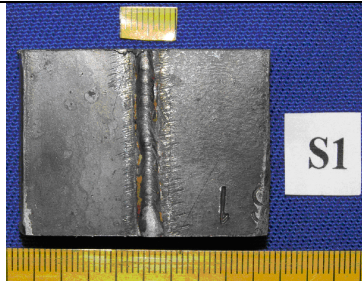
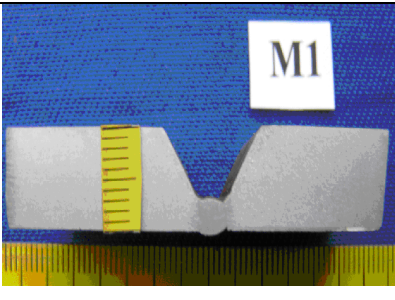
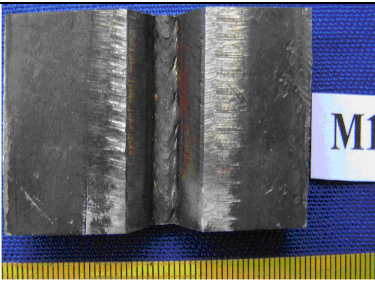
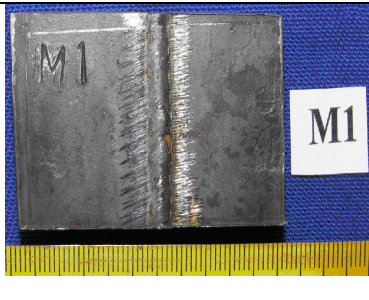
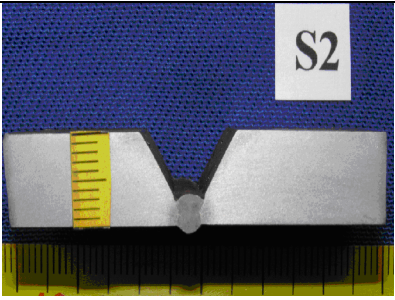
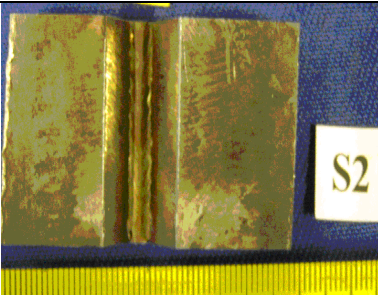
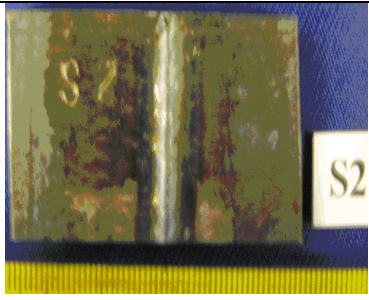
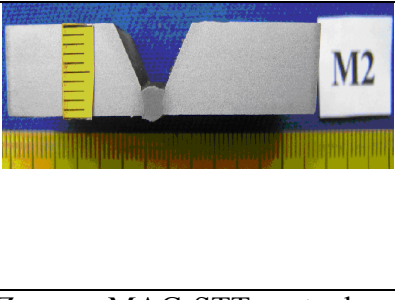
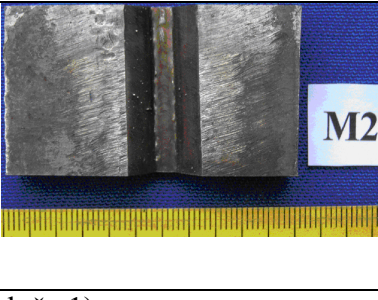
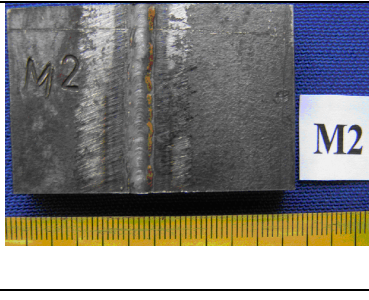
Nakon hlađenja uzoraka na svakom je bilo potrebno provesti naknadnu obradu; čekićem i turpijom očistiti srhove i trosku na rubovima koja je nastala plazma rezanjem. Nakon toga strojnom obradom su izravnane plohe na uzorcima koje analiziramo.

Slijedi brušenje uzoraka brusnim papirom. Uzorci su brušeni na staklenoj podlozi sa brusnim papirom finoće 150, zatim 180, 240, 320, 400, 500 i na kraju 600.

Nakon što je brušenje završeno izvodi se nagrizanje uzoraka da bi se vidjela makrostruktura i izgled zavara. Nagrizanje je obavljeno u laboratoriju za zaštitu materijala otopinom „NITAL“ koja sadrži 5 % HNO_3 i 95% metanola. Svaki uzorak je uronjen u tu otopinu nekoliko minuta, zatim je ispran destiliranom vodom i osušen fenom. Kao rezultat, dobiveni su uzorci na kojima se jasno vidi korijen zavara i spoj s osnovnim materijalom.

5.3. Makroizbrusci

Tablica 12. Prikaz makroizbruska

S1			
M1			
S2			
M2			
<p>S1 – Zavaren MAG-STT postupkom (ploča 1) M1 – Zavaren MAG postupkom (ploča 1) S2 – Zavaren MAG-STT postupkom (ploča 2) M2 – Zavaren MAG postupkom (ploča 3)</p>			

5.4. Zavarivanje tankih limova

U drugom dijelu eksperimenta zavarivani su limovi debljine 2mm od Č0631.

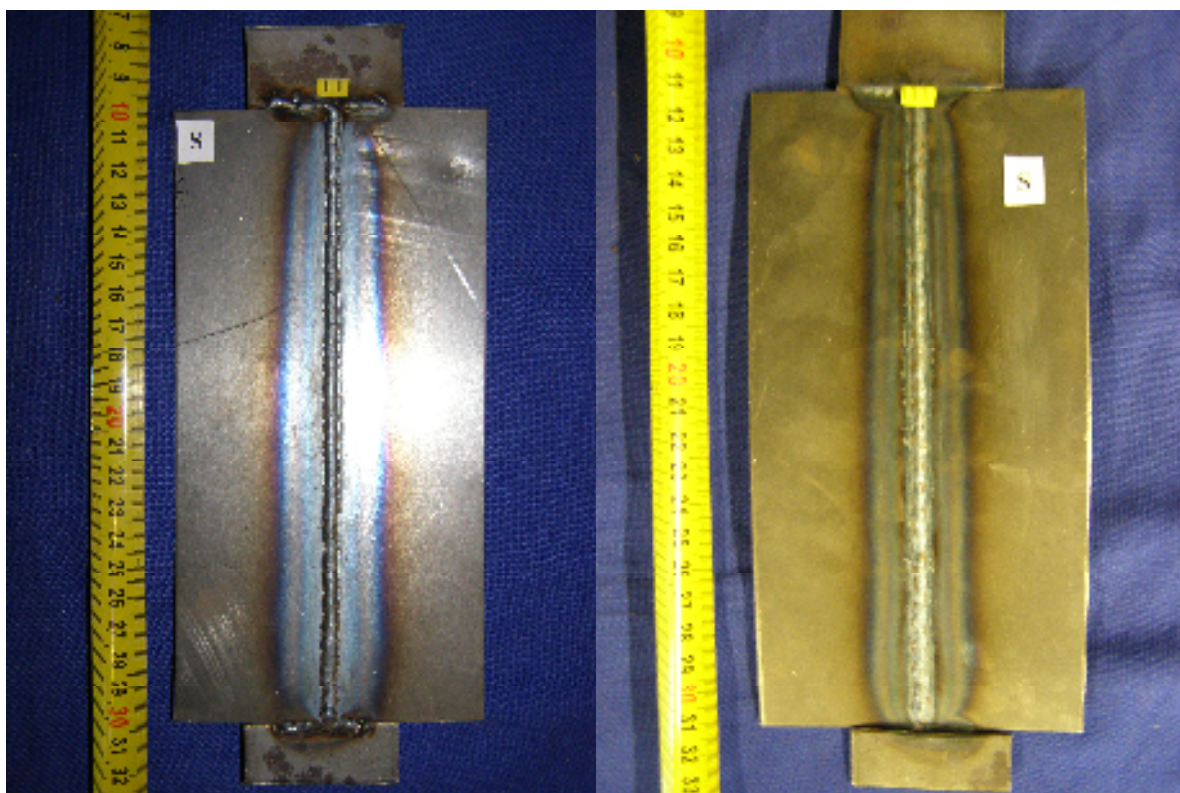
Dimenzije limova su bile 200x100 mm.

Zavarivanje limova je izvedeno u horizontalnom položaju (PA) i izvodio ga je zavarivač poluautomatskim MAG-STT i MAG postupkom.

Zavareno je dva uzorka, od kojih je jedan zavaren MAG-STT, a jedan MAG postupkom.

Tablica 13. Parametri zavarivanja limova MAG-STT postupkom

Parametri Postupak zavarivanja	I_{PC} (A)	I_{BC} (A)	I_{st} (A)	U (V)	v_z (m/min)	Q (l/min)	t (s)
MAG-STT	160	45	55	14,3	2	15	63



Slika 5.5 Limovi zavareni MAG-STT postupkom

Zavarivanje limova istih dimenzija, debljine i razmaka izvedeno je i s MAG postupkom zavarivanja.

Tablica 14. Parametri zavarivanja limova MAG postupkom

Parametri Postupak zavarivanja	I_{st} (A)	U (V)	v_z (m/min)	Q (l/min)
MAG	55	15	3	15

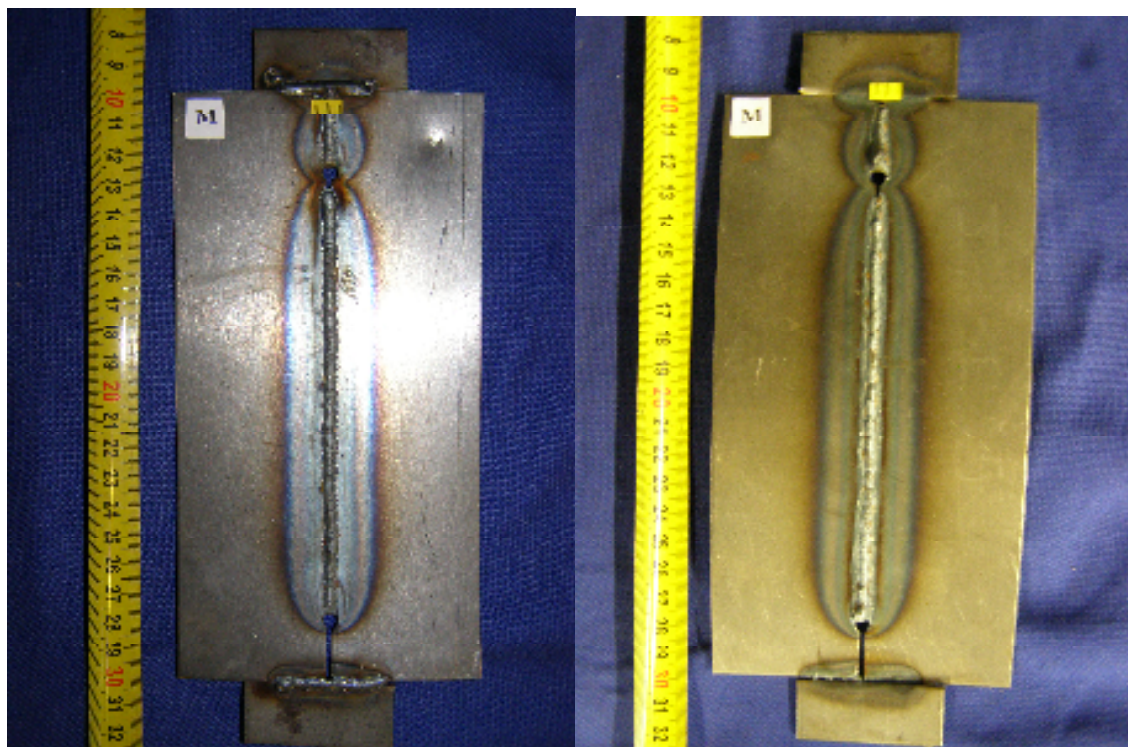
Sa ovim parametrima koji su okvirno isti kao kod MAG-STT zavarivanja nije bilo moguće zavarivati ove limove jer je preveliki unos topline i dolazi do protaljivanja lima.

U drugom pokušaju, parametri su smanjeni na minimum pri kojem možemo uspostaviti električni luk i sada su parametri bili:

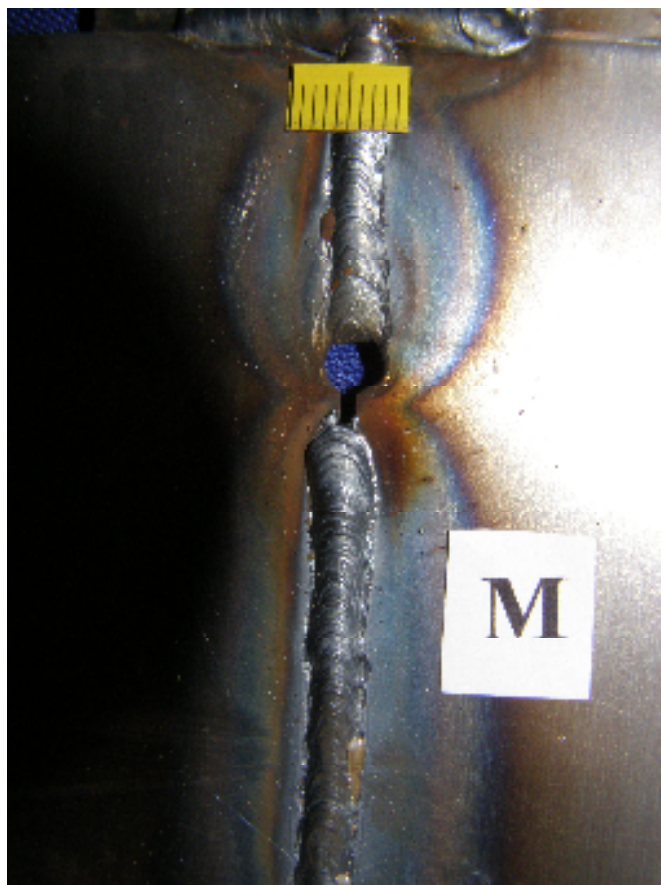
Tablica 15. Minimalni parametri zavarivanja MAG postupkom

Parametri Postupak zavarivanja	I_{st} (A)	U (V)	v_z (m/min)	Q (l/min)
MAG	44	15	3	15

Zavarivanje MAG postupkom ni sa minimalnim parametrima i unosom topline nije bilo moguće dobro izvesti kod limova jer je unos topline bio prevelik.



Slika 5.6 Pokušaj zavarivanja limova MAG postupkom



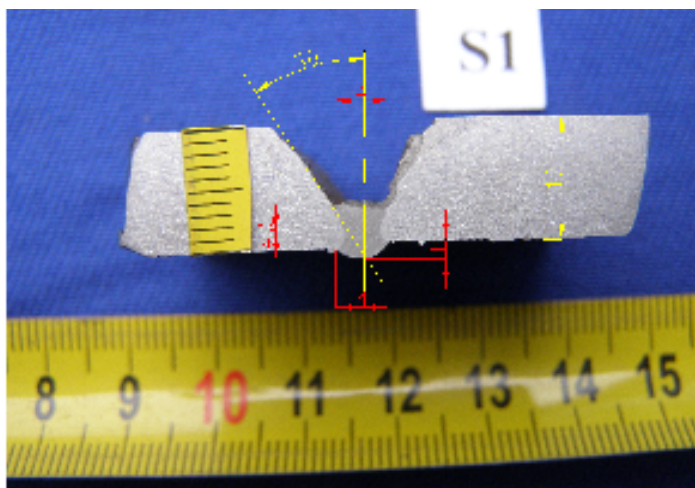
Slika 5.7 Detalj lima koji je neuspjelo zavaren MAG postupkom

Iz ovog se da zaključiti da MAG postupak zavarivanja nije primjeren za zavarivanje ovako tankih limova, jer ima preveliki unos topline.

6. Analiza rezultata

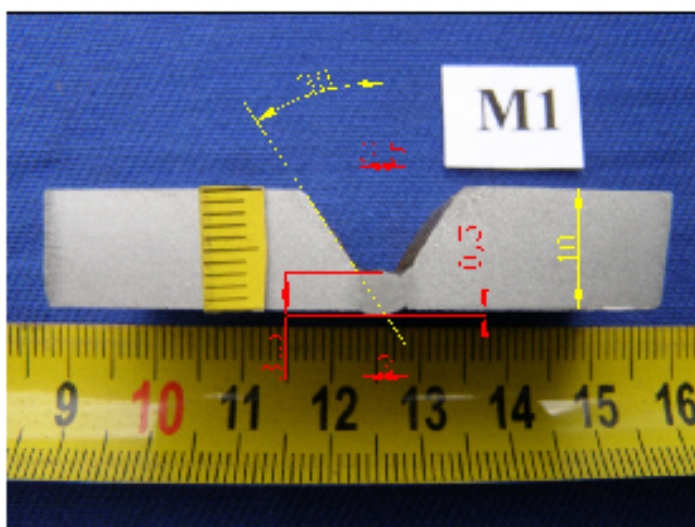
Usporedba makroizbrusaka zavarenih MAG-STT postupkom i MAG postupkom

- Usporedba uzoraka S1 i M1 zavarenih na ploči 1



S1 (MAG-STT postupak, ploča 1)

- dobro spajanje osnovnog i dodatnog materijala
- veće nadvišenje korijena nego kod MAG postupka



M1 (MAG postupak, ploča 1)

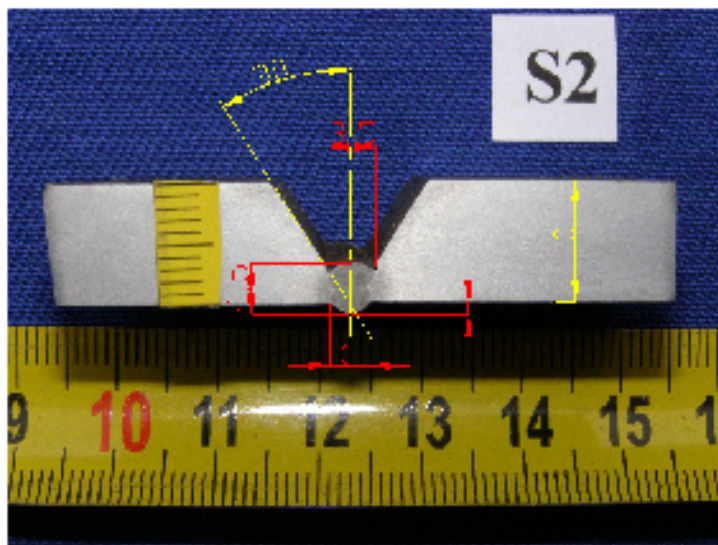
Slika 5.8 Usporedba geometrije zavora mikroizbrusaka S1 i M1

Tablica 16. Geometrije uzorka S1 i M1

	b (mm)	h (mm)	p (mm)	c (mm)	s (mm)	α
S1	4	1	4,5	4	10	30°
M1	3,5	0,5	3,5	3	10	30°

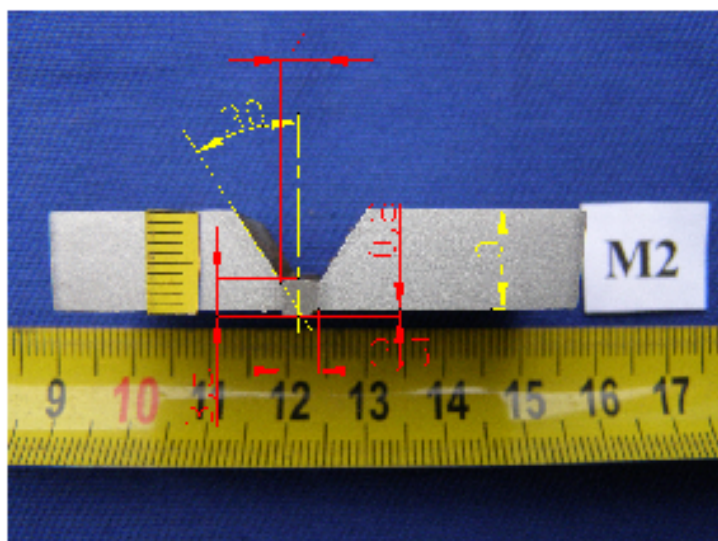
Sa zadanim parametrima i pripremom s kojima smo izveli zavarivanje kod MAG-STT i MAG postupka nema nekih prevelikih razlika u geometriji korijena.

- Usporedba makroizbruska S2 zavarenog na ploči 2 MAG-STT postupkom i makroizbruska M2 zavarenog na ploči 3 MAG postupkom zavarivanja



S2 (MAG-STT postupak, ploča 2)

- veće nadvišenje korijena nego kod MAG postupka
- veća površina korijena nego kod MAG postupka



M2 (MAG postupak, ploča 3)

- moguće naljepljivanje s lijeve strane (indikacijska linija)

Slika 5.9 Usporedba geometrije zavora makroizbrusaka S2 i M2

Tablica 17. Geometrija uzorka S2 i uzorka M2

	b (mm)	h (mm)	p (mm)	c (mm)	s (mm)	α
S2	3,5	1	4,5	3	10	30°
M2	4	0,8	3,5	3,5	10	30°

Po gore prikazanim izmjerama vidimo da korijen zavaren MAG-STT postupkom ima veće nadvišenje korijena od konvencionalnog MAG-a u svim slučajevima.

Iz eksperimenta se može zaključiti da se rezultati MAG-STT i konvencionalnog MAG postupka zavarivanja ne razlikuju puno, ako izvodimo zavarivanja u području u kojem se uspješno zavaruje MAG-om.

Pri zavarivanju tankih limova i usporedbi rezultata MAG-STT i MAG postupka zavarivanja razlika je velika zbog puno manjeg unosa topline pri zavarivanju kod MAG-STT postupka.

MAG-STT se pokazao puno ekonomičniji u usporedbi s konvencionalnim MAG iz sljedećih razloga:

- manje prskanje, a time i naknadna obrada i čišćenje zavara
- ne zahtjeva preveliku točnost pripreme
- zbog manjeg unosa topline primjenjiv za zavarivanje tanjih materijala
- pri određenim parametrima uz isti zaštitni plin daje bolju kvalitetu zavarenog spoja

7. ZAKLJUČAK

STT postupak, kao noviji postupak zavarivanja se znatno razlikuje od ostalih postupaka po drugačije izvedenom izvoru struje zavarivanja. Najveća prednost STT postupka zavarivanja je manji unos topline nego kod konvencionalnih postupaka zavarivanja, pa se time mogu lakše zavarivati tanji materijali ili korijenski prolazi cijevi. U ovom radu utvrđeno je da MAG-STT postupkom zavarivanja možemo zavarivati tanke limove uspješnije nego konvencionalnim MAG postupkom zbog manjeg unosa topline. Pri samom zavarivanju MAG-STT postupak nije osjetljiv na točnost pripreme radnih komada, jer može premostiti veće i nejednolike udaljenosti između radnih komada.

U eksperimentu je prikazano da pri usporedbi MAG-STT i MAG postupka zavarivanja nema velikih razlika, ako se izvode zavarivanja koja su u području koja se mogu uspješno zavariti MAG postupkom. Također je smanjeno prskanje pri zavarivanju MAG-STT postupkom u odnosu na MAG postupak zavarivanja, a time je kasnije smanjeno vrijeme obrade i čišćenja zavara.

8. LITERATURA

- [1]: Službena stranica Fakulteta Strojarstva i Brodogradnje u Zagrebu, www.fsb.hr/zavkon/hrv/download/MIG_MAGzav1.ppt , 10.10.2008.
- [2] Lucas W., Lordachescu D., Ponomarev V.,: Classification of metal transfer modes in GMAW, Universitatea Dunarea de Jos din Galati, Romania; Paton Welding Institute, Ukraine; TWI, UK 2003, IIW Doc. No XII-1859-2-05
- [3]: Lincoln Electric Europe: STT II i LF 30, http://www.agrolim.hr/assets/pdf/lincoln/lincoln_invertec30.pdf , 20.10.2008.
- [4] Neessen F., Naber F.: The GMAW-STT process – An advanced welding process, Lincoln Smitweld B.V., Nijmegen, Nizozemska, 2003.
- [5]: The Lincoln Electric Company: Invertec STT II, Ohio, SAD, http://www.airgas.com/documents/pdf/specsheet/i-m/lin_lincoln/e452.pdf , 20.10.2008.
- [6] Deruntz B.: Assessing the Benefits of Surface Tension Transfer Welding to Industry, Industrial Technology, 2003, Volume 19, Number 4
- [7] Despotović B., Samardžić I.: Neki aspekti primjene STT postupka zavarivanja u kotlogradnji, 3rd International Conference, Mechanization, Automation And Robotization in Welding and Allied Processes, Zadar, 2005.
- [8]: The Lincoln Electric Company: Surface Tension Transfer – Waveform Control Technology, <http://content.lincolnelectric.com/pdfs/products/literature/nx310.pdf> , 21.10.2008.
- [9] Siewert T., Samardžić I., Kolumbić Z., Klarić Š.: On-Line Monitoring System – An Application For Monitoring, Tehički vjesnik, 2008, 15, 9-18., hrcak.srce.hr/file/41005 , 21.10.2008.
- [10]: The Lincoln Electric Company: Surface Tension Transfer, <http://www.treatrade.hr/pdf/DM/stt2.pdf> , 22.10.2008.